

## **Раздел 7. Понятие о пространственных конструкциях в покрытиях.**

### **7.1. Основные формы и конструктивные особенности пространственных конструкций из дерева и пластмасс.**

Конструктивные системы, которые обеспечивают совместную работу составляющих их элементов в двух и более плоскостях, являются пространственными конструкциями.

Пространственные конструкции из древесных и синтетических материалов отличаются большим разнообразием видов и конструктивных особенностей. Они могут быть такими же, как конструкции, выполняемые из стали, железобетона, армоцемента, имея в то же время свои особенности. Как и любые пространственные конструкции они, как правило, совмещают в себе несущие и ограждающие функции, при одном и том же расходе материала обладают более высокой надежностью и несущей способностью, их характеризует меньшая материалоемкость, а при агрессивности среды - большая долговечность.

Пространственные конструкции используют в зданиях и сооружениях, где нежелательны или недопустимы промежуточные опоры (спортивные сооружения, промышленные здания с гибкой технологией и т.п.) и в зданиях с жесткой планировочной сеткой опор (зонтичные оболочки кассовых вестибюлей, торговых павильонов, выставочных залов, служебных помещений и т.д.). Пространственные конструкции из дерева и пластмасс успешно применяют при малых пролетах (3-4 м), средних (до 36 м) и больших - висячие покрытия до 100 м, сводчатые до 140 м, купола до 257 м. Эти материалы позволяют создавать разнообразные конструктивные формы, реализующие практически любые замыслы проектировщиков.

Подобрать универсальный классификационный признак и сгруппировать пространственные конструкции не представляется возможным, поскольку любая классификация будет условной. Можно лишь говорить о материале конструкций, геометрии и способе образования поверхности, пологости и крутизне, характере работы и конструктивных

особенностях, способе опирания и очертании плана здания, пролете и т.д. Поэтому для удобства дальнейшего рассмотрения отдельных видов конструкций из всего многообразия существующих форм расчленим их сначала по геометрическому признаку, а затем в каждой группе учтем конструктивные особенности покрытия.

С точки зрения конструктивного признака целесообразно выделить следующие наиболее распространенные типы покрытий - оболочки, купола (сферические, конические и т. д.) и своды. По общему конструктивному исполнению конструкции могут быть тонкостенные, ребристые, сетчатые; по типу поперечного сечения - одно-, двух- и трехслойные.

Все виды пространственных конструкций представляют собой взаимосвязанную систему каркаса, жесткого или гибкого, и элементов ограждения - обшивок, настилов или панелей. Только пневматические конструкции выполнены из герметичных мягких тканевых материалов и представляют собой замкнутые оболочки, стабилизированные внутренним избыточным давлением воздуха. Для пространственных конструкций свойственна многократная статическая неопределимость расчетной схемы, что приводит к перераспределению внутренних усилий между несущими элементами каркаса и ограждения, а также к снижению влияния локальных дефектов в составе отдельных элементов и узлов.

## **7.2 Оболочки (разработки ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко)**

Оболочкой называют конструкцию, образованную криволинейной поверхностью, толщина которой очень мала по сравнению с остальными ее размерами. В зависимости от геометрии поверхности оболочки бывают различной кривизны (гауссовой): положительной (сферической и эллиптической), отрицательной (гиперболической) и нулевой (цилиндрической и конической) (рис. 7.2.1).



*Рис. 7.2.1. Оболочки*

Достоинствами оболочек являются экономичность расхода материалов, повышенная жесткость и прочность, позволяющая перекрывать большие пролеты.

Рассмотрим пологие оболочки положительной гауссовой кривизны (рис. 7.2.2).

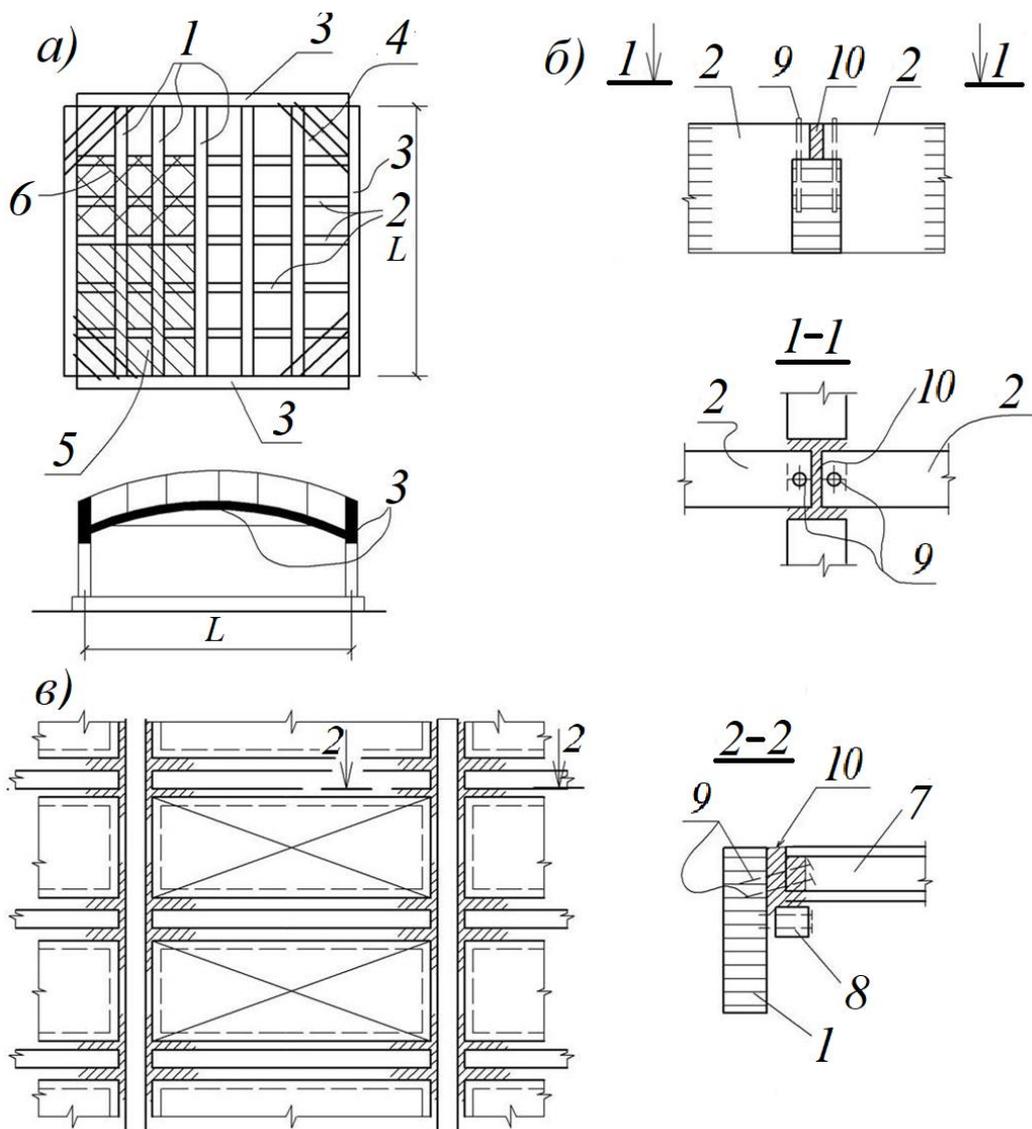


Рис. 7.2.2. Оболочки: а-в - пологие оболочки положительной гауссовой кривизны - конструкция, узлы: 1 - главные ребра, 2 - поперечные ребра-вставки, 3 - контурные элементы, 4 - арматурные стержни, 5 - дощатый настил, 6 - дополнительные ребра-вставки, 7 - клефанерная плита покрытия, 8 - черепной брусок, 9 - вклеенные стержни, 10 - полимерцементный раствор

Оболочка может быть в плане квадратной или прямоугольной. Стрела подъема конструкции  $f=(1/12-1/15)L$ . Каркас конструкции (рис. 7.2.2 а) образован системой ортогональных дощатоклееных ребер, главных (поз. 1) и поперечных (поз. 2), установленных на контурные элементы 3 параллельно сторонам основания с шагом 3-4 м. Главные ребра выполняют в виде дощатоклееных двухшарнирных арок с размерами поперечного сечения  $h=(1/60-1/70)L$  при ширине сечения  $b=120-160$  мм, оборудованных съемными затяжками на время монтажа. Поперечные ребра представляют собой вставки, которые выполняют в виде отрезков криволинейных

дощатоклеенных блоков, и устанавливают между главными ребрами (рис. 7.2.2 б). Контурные элементы при пролете до 40 м выполняют дощатоклееными в виде арок с затяжками или ферм. Все три типа дощатоклеенных элементов, установленные в конструкцию, имеют одинаковое очертание.

В углах каркаса оболочки устанавливают арматурные стержни (поз. 4), служащие для взаимной фиксации бортовых элементов от действия распора, вызванного главными растягивающими усилиями в оболочке.

Ограждающие элементы могут быть выполнены в виде настила из досок или клефанерных плит. Дощатый однослойный настил (поз. 5) устанавливают по верху ребер и выполняют из досок толщиной 25-40 мм. При этом раскладку досок следует производить в направлении растягивающих усилий в оболочке. Для крепления настила следует устанавливать в каркас дополнительные ребра-вставки (поз. 6) и забивать не менее двух гвоздей в каждой точке сопряжения доски с каркасом оболочки. Клефанерные плиты покрытия (поз. 7) (рис. 7.2.2 в) устанавливают по черепным брускам (поз. 8) заподлицо с верхней пластью дощатоклеенных ребер каркаса. Жесткое сопряжение плит покрытия с ребрами каркаса следует обеспечивать установкой вклеенных стержней (поз. 9) из арматуры класса А-300 или А-400 диаметром 10-12 мм в углах плит, а также замоноличиванием соответствующих участков стыка 10 цементным раствором с добавлением 15% клея ПВА. Расчет оболочек ведется по безмоментной теории:

- нормальные усилия:

$$T_1 = 2(X^2 - a^2)x[C_1 + C_2(6Y^2 + X^2 - b^2)];$$

$$T_2 = 2(Y^2 - b^2)x[C_1 + C_2(6X^2 + Y^2 - a^2)];$$

сдвигающие усилия:  $S = -4XY[C_1 + C_2(2X^2 + 2Y^2 - a^2 - b^2)];$

- главные усилия:  $T_m = 0.5(T_1 + T_2) + \sqrt{(0.5(T_1 - T_2))^2 + S^2}$

где для квадратной в плане оболочки:

$$C_1 = \frac{0.2922q}{k a^2}; \quad C_2 = \frac{0.0591q}{k a^4};$$

где  $q$  - нагрузка, равномерно распределенная по проекции оболочки;  $k=1/R$  - кривизна оболочки в направлении осей  $X$  и  $Y$ ;  $a, b$  - размеры полусторон плана оболочки.

Рассмотрим цилиндрические оболочки (рис. 7.2.2).

Цилиндрические оболочки бывают короткие (рис. 7.2.3 а) и длинные (рис. 7.2.3 б) - в зависимости от отношения размеров конструкционного блока  $L/B$ , где  $L$  - длина волны оболочки,  $B$  - пролет оболочки, определяемые шагом колонн в здании. Стрела подъема конструкции  $f=(l/8-l/6)L$ .

Каркас цилиндрической оболочки включает: торцевые диафрагмы (поз. 1) в виде дощатоклееных арок с затяжками, размеры поперечного сечения которых принимают  $h=l/60L$ ,  $b=l/3h$ ; бортовые элементы (поз. 2) в виде дощатоклееных балок с высотой прямоугольного сечения  $h=(1/15-1/20)B$ ; поперечные дощатоклееные ребра (поз. 3), имеющие очертание диафрагм (поз. 1) с высотой поперечного сечения  $h=(1/60-1/70)L$  и временными затяжками на период монтажа; продольные ребра (поз. 4) и арматурные стержни (поз. 5) в углах каркаса.

Ограждающие элементы выполняют в виде дощатого настила (поз. 6) или клефанерных плит (поз. 7). При шаге поперечных ребер  $B_p < 3$  м дощатый настил выполняют одинарным с укладкой досок в направлении бортовых элементов. При шаге поперечных ребер  $B_p \geq 3$  м устраивают двойной перекрестный настил под углом  $45^\circ$  к направлению бортовых элементов, а для обеспечения жесткости дощатого настила в каркас дополнительно устанавливают продольные ребра (поз. 4). При ограждении из клефанерных плит (поз. 7) последние следует устанавливать на черепных брусках 8 заподлицо с верхней пластью дощатоклееных элементов каркаса.

Жесткое сопряжение клефанерных плит покрытия с элементами каркаса (рис. 7.2.3 б).

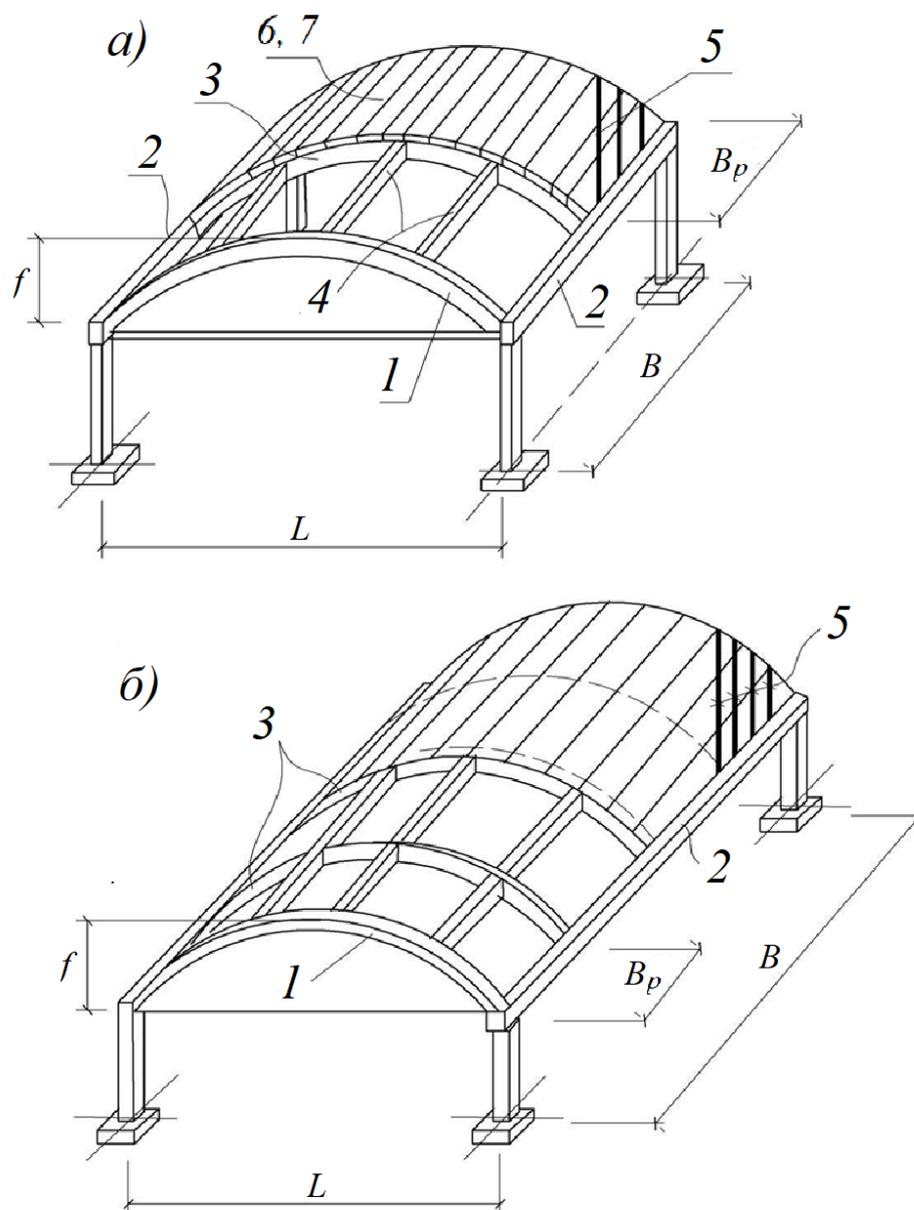


Рис.7.2.3. Цилиндрические оболочки: а) - короткая цилиндрическая оболочка, б) - длинная цилиндрическая оболочка. 1 - торцевые диафрагмы, 2 - бортовые элементы, 3 - поперечные ребра, 4 - продольные ребра, 5 - арматурные стержни в углах каркаса, 6 - дощатый настил, 7 - клефанерная плита покрытия

Расчет коротких цилиндрических оболочек производят приближенно по методу предельного равновесия (модель расчета А.Р. Ржаницына). Расчет длинных цилиндрических оболочек следует производить приближенно, как для балок с криволинейным поперечным сечением.

Рассмотрим оболочки отрицательной (гиперболической) кривизны (рис. 7.2.4). Гиперболические параболоиды (гипары) представляют собой

поверхность двойкой кривизны на прямоугольном или квадратном плане. При этом гипары выполняют из прямолинейных элементов - досок, брусков или фанерных полос, установленных на прямолинейные бортовые элементы. Поверхность гипара образуется пространственным преобразованием плоского четырехугольника - кососимметричным поворотом противоположных сторон друг относительно друга при сохранении их прямолинейности.

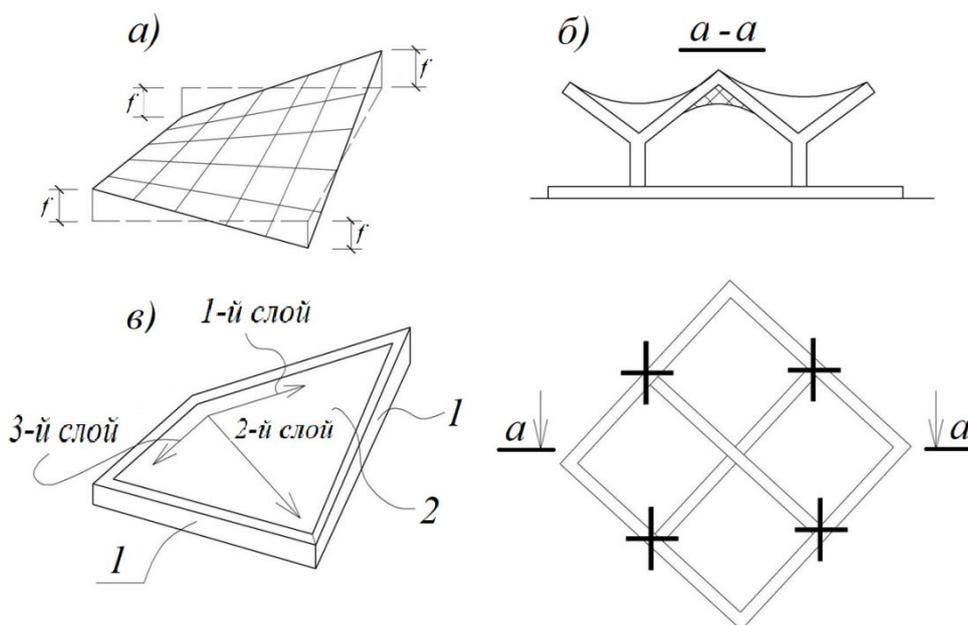


Рис. 7.2.4. Оболочки отрицательной (гиперболической) кривизны - гипары: а) - формообразование гипара, б) - раскладка досок в однопролетном гипаре, в) - многолепестковый гипар

Каркас включает бортовые элементы (поз. 1), которые выполняют дощатоклееным прямоугольным сечением  $h > l/30 - 1/25L$  и  $b > 1/3h$ , где  $L$  - длина бортового элемента. Ограждающие элементы (поз. 2), образующие оболочку, могут быть деревянные или фанерные. Деревянные оболочки создают, например, из двух слоев шпунтованных досок, уложенных в направлении главных диагоналей оболочки, или из трех слоев, расположенных под  $45^\circ$  друг относительно друга. Слои досок соединяют на гвоздях или склеиванием, концы досок вводят между слоями в дощатоклееные бортовые элементы, где фиксируют на клеегвоздевой запрессовке. Фанерные оболочки выполняют в виде ребристых

клефанерных плит, которые изготавливают с закручиванием торцов в соответствии с очертанием оболочки.

Возможно создание сборных многосекционных конструкций из модульных элементов-оболочек типа гипар (рис. 7.2.4 в), стыкуемых между собой бортовыми элементами.

### **7.3 Купола.**

Купол представляет собой пространственную конструкцию с круглым или многоугольным планом, а так же с криволинейным или многоугольным очертанием в вертикальной плоскости (рис.7.3.1).



*Рис. 7.3.1 Купола*

По конструкции купола подразделяют на купола-оболочки, ребристые, ребристо-кольцевые, ребристо-кольцевые с решетчатыми связями и сетчатые купола. Материалом для куполов служат конструкционные композиции из цельной и клееной древесины, фанеры, пластмасс, а так же крепежных металлических элементов.

Рассмотрим купола – оболочки (рис. 7.3.2).

Купола-оболочки имеют поверхность, образованную вращением плоской кривой (в виде дуги, круга, эллипса, параболы и т.п.) вокруг вертикальной оси. Элементами купола являются растянутое опорное кольцо 1 и осесимметричная континуальная тонкостенная оболочка вращения 2.

Пластмассовые купола-оболочки (рис. 7.3.2 а) бывают однослойные (свето-прозрачные), двух- и трехслойные (утепленные). В двухслойных куполах наружный слой - стеклопластиковый, внутренний - пенопластовый. Диаметр одно- и двухслойных куполов составляет до 24 м. Трехслойные купола состоят из стеклопластиковых обшивок толщиной 3 мм и среднего слоя из пенополистирола, сотопласта или воздушной прослойки. Диаметр трехслойных куполов - до 25 м при толщине оболочки до 50 мм.

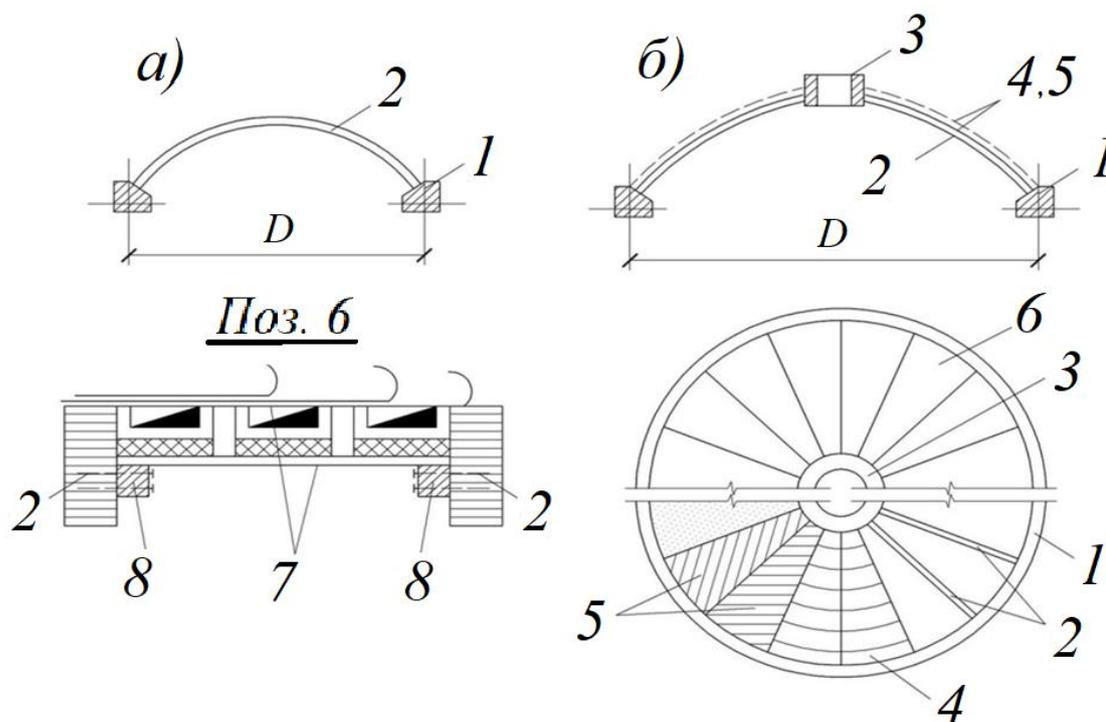


Рис. 7.3.2. Тонкостенные купола-оболочки: а - из пластмасс: 1 - опорное кольцо, 2 - оболочка; б - с ребрами из досок или с фанерными обшивками: 1 - опорное кольцо, 2 - меридианные ребра

*(арочки), 3 - фонарное кольцо, 4 - кольцевой настил из досок, 5 - косой настил из досок, 6 - клеефанерный ребристый щит, где: 7 - фанерные обшивки, 8 - черепные бруски*

Тонкостенные купола-оболочки сферического очертания с применением древесины выполняют диаметром до 35 м (рис. 7.3.2 б). Каркас купола состоит из опорного кольца (поз. 1), сбитых из досок или дощатоклееных меридианных ребер (арочек) (поз. 2), фонарного кольца (поз. 3). Ограждение включает кольцевой настил (поз. 4) и косой настил (поз. 5) из досок. Опорное кольцо, которое выполняют дощатоклееным, железобетонным или металлическим, воспринимает распор меридианных ребер и работает на растяжение. Дощатоклееные ребра имеют высоту сечения  $h > 1/250 D$ , установлены с шагом 0.8-1,5 м и воспринимают меридианные сжимающие усилия в оболочке. Фонарное кольцо, которое выполняют металлическим, или деревянным дощатоклееным, или кружальным, работает на сжатие. Кольцевой настил воспринимает кольцевые усилия: в нижней части купола в зоне растягивающих кольцевых усилий устраивают двойной настил из досок толщиной 19-25 мм, уложенных друг на друга со сдвигом на половину длины доски; в зоне действия сжимающих кольцевых усилий настил выполняют из одного слоя досок толщиной 40-50 мм.

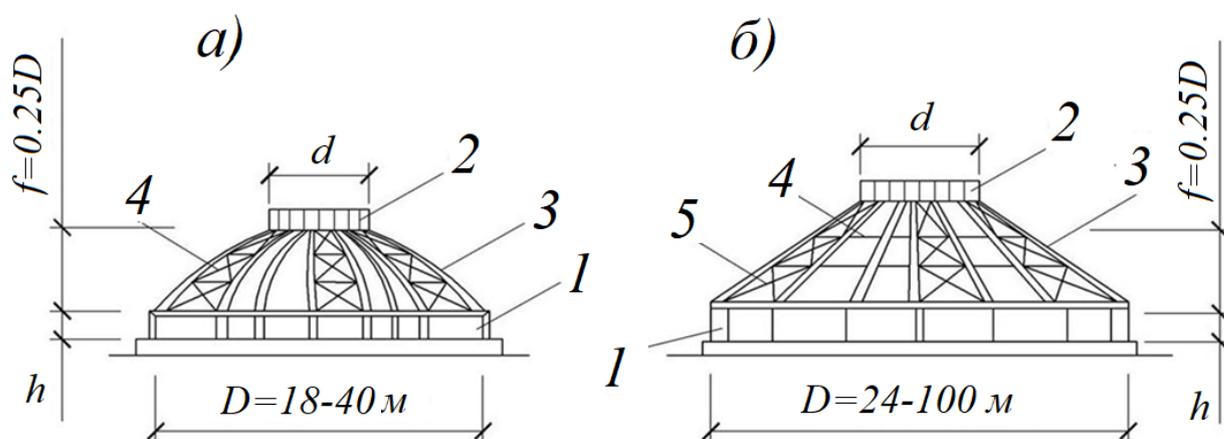
Крепление настила к меридианным ребрам - на гвоздях. Косой настил воспринимает сдвигающие усилия и выполняется из досок толщиной 16-25 мм. Положение косого настила по отношению к меридианным ребрам - под углом  $45^\circ$  с чередованием направления в соседних отсеках между ребрами. Меридианные ребра и дощатый настил могут быть заменены клеефанерными крупнопанельными элементами заводского изготовления (поз. 6), в которых объединены дощатоклееные меридианные ребра (поз. 2) и ребристые фанерные ограждения (поз. 7), в том числе утепленные, уложенные по верхнему поясу ребер (поз. 2) и по черепным брускам (поз. 8). Статический расчет куполов-оболочек выполняют по безмоментной теории.

Рассмотрим ребристые, ребристо-кольцевые купола (рис. 7.3.3).

Ребристые купола (рис. 7.3.3,а) следует проектировать диаметром 18-40 м, ребристо-кольцевые (рис. 7.3.3,б) - 24-100 м.

Каркас куполов состоит из колец опорного (поз. 1) и фонарного (поз. 2), гнутоклееных или прямолинейных меридианных ребер (поз. 3), связей в покрытии (поз. 4). Ребристые купола имеют прогоны (поз. 5) для устройства покрытия, ребристо-кольцевые купола - кольцевые ребра (поз. 5). Ограждающие элементы покрытия (поз. 6) - в виде дощатого настила, обшивок из листовых материалов или клефанерных плит.

Опорное кольцо (поз. 1) работает на растяжение. При установке купола в наземном положении кольцо следует устраивать железобетонным и совмещать с конструкцией фундамента. Фонарное кольцо (поз. 2) работает на изгиб и кручение. Диаметр кольца определяется размещением на нем торцов меридианных ребер. Кольцо удобно выполнять из отрезка стальной трубы с толщиной стенки 8-10 мм, внутри кольца следует ставить ребра жесткости. Высоту поперечного сечения меридианных дощатоклееных ребер (поз. 3) назначают  $1/60-1/120 D$ , шаг ребер по опорному кольцу - 4.5-8 м. Связи (поз. 4) объединяют меридианные ребра попарно и повышают устойчивость ребер из плоскости, а также общую жесткость покрытия. Высоту сечения кольцевых ребер (поз. 5) назначают как для балочных элементов из условия  $h > 1/20A$ , где  $A$  - расстояние между меридианными ребрами. Шаг кольцевых ребер из условий монтажа и работы покрытия - не более 3 м.



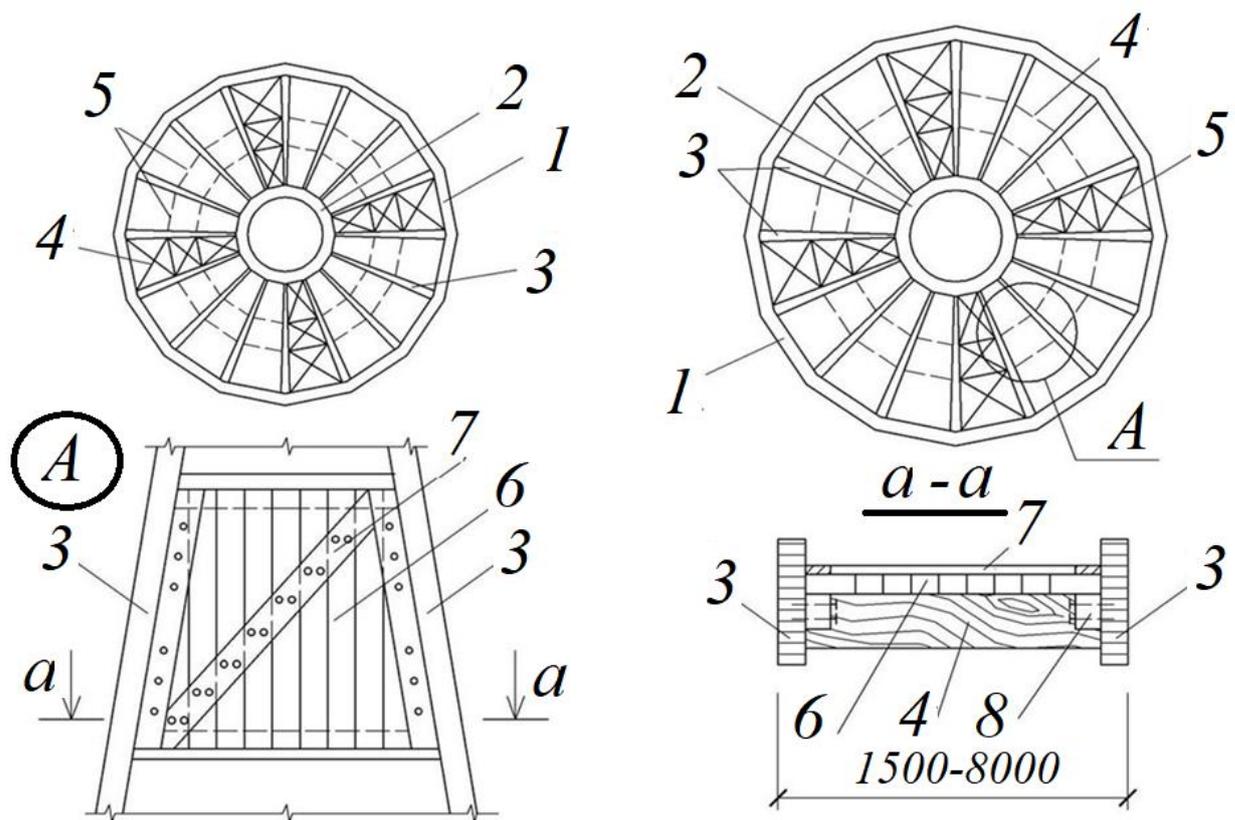


Рис. 7.3.3. Ребристые купола-оболочки: а - ребристый купол; б - ребристо-кольцевой купол: 1 - опорное кольцо, 2 - фонарное кольцо, 3 - меридианные ребра, 4 - связи, 5 - кольцевые прогоны и ребра, 6 - дощатый щит, 7 - раскос

Если дощатый настил в ребристых куполах укладывают по прогонам в два слоя - продольный и косой, то связи 4 могут ставиться только на время монтажа. При диаметре купола более 30 м настил устраивают однослойным в виде щитов (поз. 6) из досок толщиной 25-40 мм. Работа щитов на сдвиг обеспечивается деревянными раскосами (поз. 7), которые крепятся к каждой доске щита двумя гвоздями. Щиты укладывают на черепные бруски (поз.8). Плиты покрытия могут быть клефанерными или деревянными трехслойными с обшивками из досок толщиной 19-25 мм.

Статический расчет ребристых куполов можно выполнять приближенно, рассматривая купол как пространственную стержневую систему из меридианных и кольцевых ребер. При этом настил может быть учтен в качестве полок таврового сечения кольцевых ребер, а расчетная схема представляет собой образованную меридианными ребрами плоскую арку с несколькими затяжками, соответствующими кольцевым ребрам.

Проверку прочности кольцевых ребер следует производить на центральное сжатие:

$$\sigma_c = \frac{N}{\varphi F_{\text{расч}}} \leq R_c^p$$

где  $\sigma_c$  - напряжения сжатия, МПа;  $N$  - расчетная продольная сила, Н ;  $\varphi$  - коэффициент продольного изгиба;  $R_c^p$  - расчетное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон, МПа;  $F_{\text{расч}}$  - расчетная площадь поперечного сечения элемента, мм<sup>2</sup>.

Проверку прочности меридианных ребер следует производить на сжатие с изгибом:

$$\sigma_c = \frac{N}{F_{\text{расч}}} + \frac{M_d}{W_{\text{расч}}} \leq R_c^p$$

где  $M_d$  - изгибающий момент от действия продольных и поперечных нагрузок, определяемый по деформированной схеме с учетом дополнительного момента в деформируемом стержне от продольной сжимающей силы  $N$ ;  $W_{\text{расч}}$  - расчетный момент сопротивления поперечного сечения элемента, мм<sup>3</sup>.

Вид купола из клееной древесины пролетом 95 м в процессе монтажа представлен на рисунке 7.3.4. Конструкция купола диаметром 100 м из клееной древесины представлен на рисунке 7.3.5.



*Рис. 7.3.4. Купольное покрытие диаметром 95 метров с каркасом из клееной древесины в г. Новосибирске. Проект ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко*

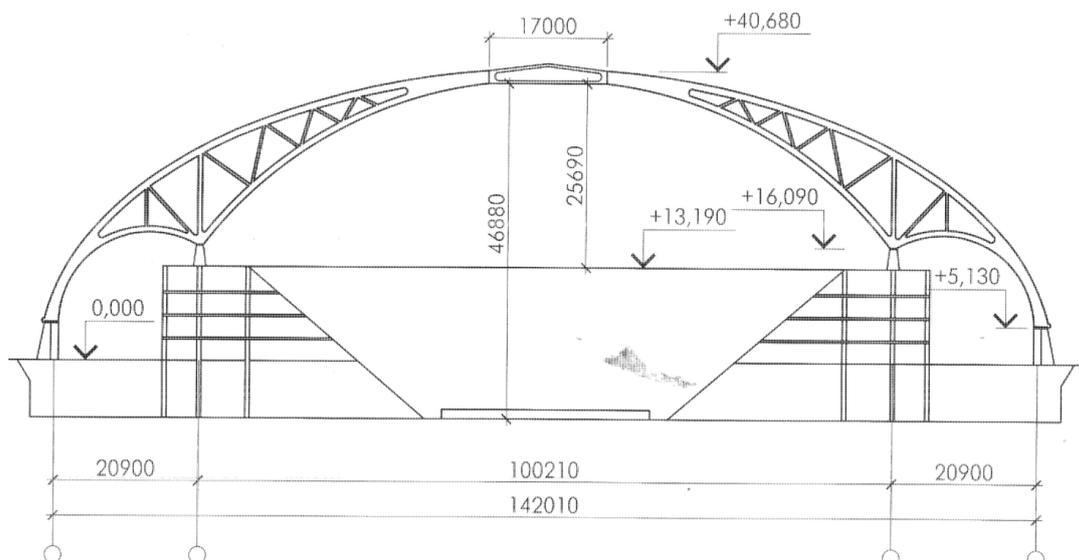


Рис. 7.3.5.

Купольное покрытие диаметром 100 метров с каркасом из клееной древесины в г. Сочи. Проект ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко

## 7.4 Пневматические конструкции.

### 7.4.1 Общие сведения.

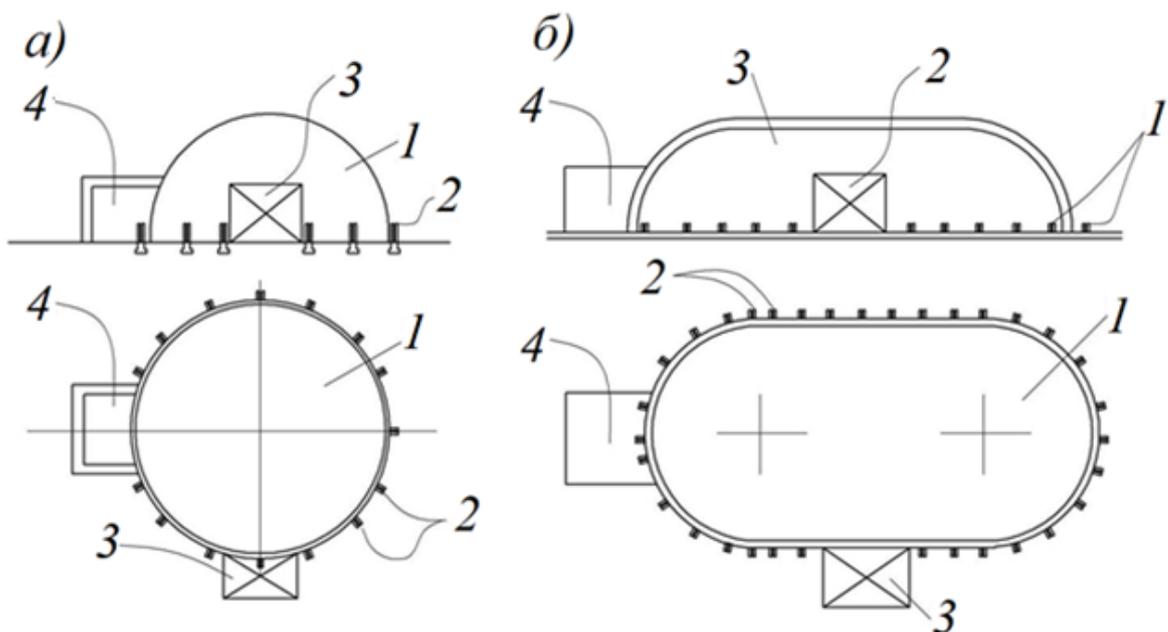
Пневматические сооружения (рис. 7.4.1) относятся к группе мягких оболочек, которые выполнены из тканевых материалов малой толщины, воспринимающих только растягивающие усилия.





*Рис.7.4.1. Пневматические конструкции*

Пневматические строительные конструкции покрытий по характеру работы очень близки к пространственным висячим и тентовым мембранам. Оболочки этих конструкций, изготовленные из тканых материалов, способны стабилизировать свою форму только при наличии предварительного напряжения. В отличие от тентовых мембран, где предварительное напряжение создается механическим путем, пневматические конструкции реализуют предварительное напряжение вследствие разности давления (избыточного или вакуума) в подоболочечном и окружающем конструкцию пространстве с помощью базового комплекта оборудования (рис. 7.4.2).



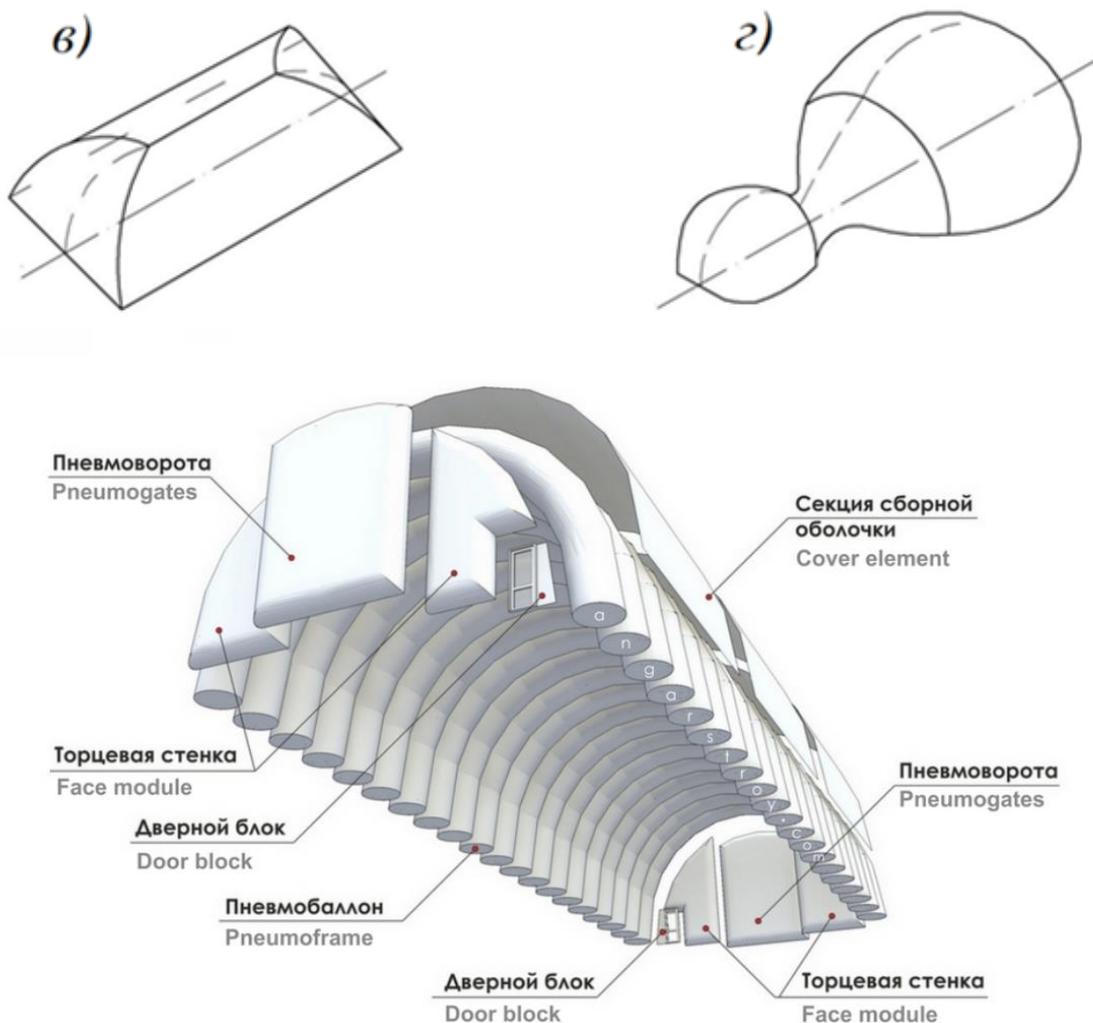


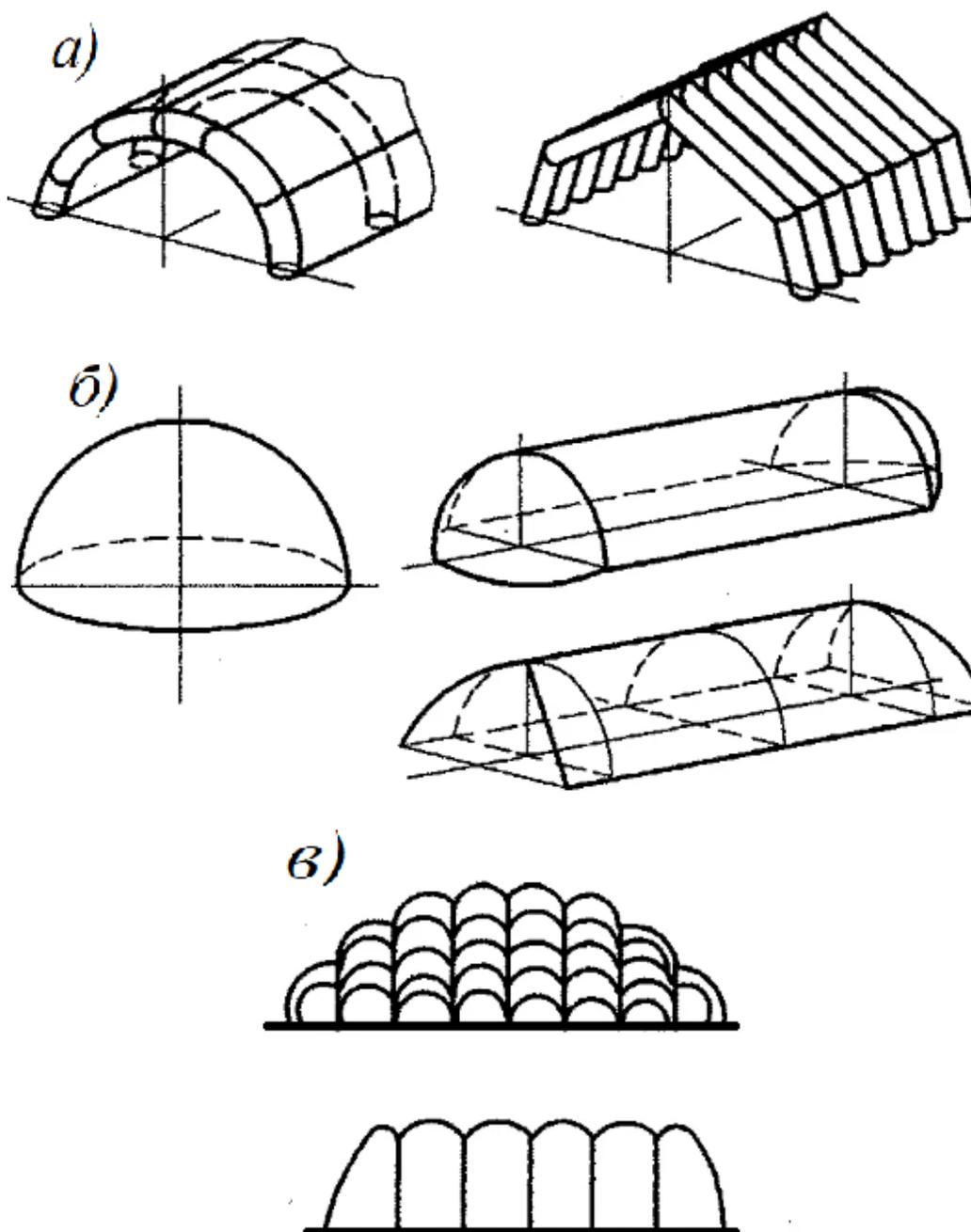
Рис.7.4.2. Пневматические воздухоопорные конструкции с базовым комплектом оборудования: а) - сфера, б) - цилиндр-сфера, в) - цилиндр-цилиндр, г) - сфера-сфера: 1 - оболочка, 2 - опорное устройство, 3 - воздухоподающая установка, 4 - иллюзовая камера

Возникнув в конце сороковых годов нашего столетия благодаря успехам химии полимеров, пневматические конструкции сразу вступили в полосу своего бурного развития, подготовленную высоким уровнем техники и технической культуры производства.

Среди преимуществ пневматических конструкций следует отметить малый собственный вес, высокую мобильность, быстроту и простоту возведения, возможность перекрытия больших пролетов, высокую степень заводской готовности и др.

Пневматические строительные конструкции в зависимости от характера работы обычно разделяются на две самостоятельные группы - пневмокаркасные (надувные) и воздухоопорные (рис. 7.4.3).

Пневмокаркасные конструкции - это надувные стержни или панели, несущая способность которых (сопротивление сжатию, изгибу, кручению) обеспечивается повышенным давлением воздуха в замкнутом объеме элемента. Большое внутреннее давление воздуха (до 150 кПа) требует высокой степени герметичности и прочности материала. Это же условие ограничивает пролет конструкций, который с учетом экономической целесообразности для рядовых сооружений не превышает 15-16 м. Стоимость пневмокаркасных конструкций в 3-5 раза выше, чем воздухоопорных. Эти недостатки сдерживают их применение.



*Рис. 7.4.3. Виды пневматических строительных конструкций а) - воздуонесомые (пневмокаркасные); б) - воздухоопорные; в) - воздухоопорные, усиленные канатами или сетками*

Основным достоинством пневмокаркасных конструкций является отсутствие избыточного давления воздуха в эксплуатируемом пространстве и, как следствие этого, потребности в процессе шлюзования. Пример неординарных пневмокаркасных конструкций - павильон Фудзи (рис. 7.4.4) и передвижная выставка «Мир кокса» (рис. 7.4.5).



*Рис. 7.4.4. Павильон Фудзи в г. Осаке*

Павильон Фудзи состоит из 16 пневмоарок диаметром 4 и длиной 78 м, расположенных по окружности диаметром 50 м. В обоих торцах оставлены проемы шириной 10 м. Тканевая основа материала с разрывной прочностью 400 кН/м и массой 3,5 кг/м<sup>2</sup> состоит из поливинилспиртового волокна. Наружная сторона ткани покрыта хайпалоном, внутренняя - поливинилхлоридом. Обычное давление в арках 10 кПа. Оно может быть повышено до 25 кПа при штормовых ветрах. Обычно диаметр пневмокаркасных элементов не превышает 1 м. Увеличение диаметра арок в павильоне Фудзи позволило снизить внутреннее давление в них и величину растягивающих усилий.

Оболочка покрытия театра (рис. 7.4.3) поддерживается пневматическими трубчатыми элементами диаметром 3 м, образующими три арки пролетом 23 м. Внутренняя оболочка потолка была выполнена в виде мембраны с канатами. Обе оболочки - кровельная и потолочная герметично прикреплялись по периферии аудитории к основанию и пространство между оболочками находилось под отрицательным давлением (вакуумом) 0,1 кПа. При штормах для предотвращения флаттера оболочки давление повышалось до 0,2 кПа. В этом сооружении сочетаются конструкции двух типов - пневмокаркасные и воздухоопорные.



*Рис. 5.4.5. Передвижная выставка «Мир кокса»*

Воздухоопорные конструкции представляют собой оболочки, стабилизированные в проектном положении незначительной разницей давления в разделяемых оболочкой пространствах. Это конструкции, которые опираются на воздух. Для противодействия внешним нагрузкам давление воздуха под оболочкой по сравнению с атмосферным повышается в пределах 10-40 кПа. Такое незначительное избыточное давление не осложняет требований к герметичности и к самочувствию находящихся под оболочкой людей. Некоторые схемы воздухоопорных конструкций приведены на рисунках 7.4.3.

Наибольшее распространение получили оболочки в форме цилиндрических сводов и сферических куполов. Поскольку оболочка «лежит» на воздушной подушке, пролеты воздухоопорных конструкций теоретически не имеют ограничений. Практически пролет оболочек без усиления канатами или тросовыми сетками достигает 50-70 м. Пролеты оболочек, усиленные тросами, достигают 168 м, что не является предельным. Например, проект покрытия города на 20 тыс. жителей, разработанный в форме купола, имеет диаметр 2 км, высоту 240 м, диаметр несущих канатов из полиэфирного волокна 270 мм. Гарантированный срок службы покрытия 100 лет. Давление под оболочкой всего 250 Па.

Крепление пневматических конструкций к основанию представлено на рисунке 7.4.6.

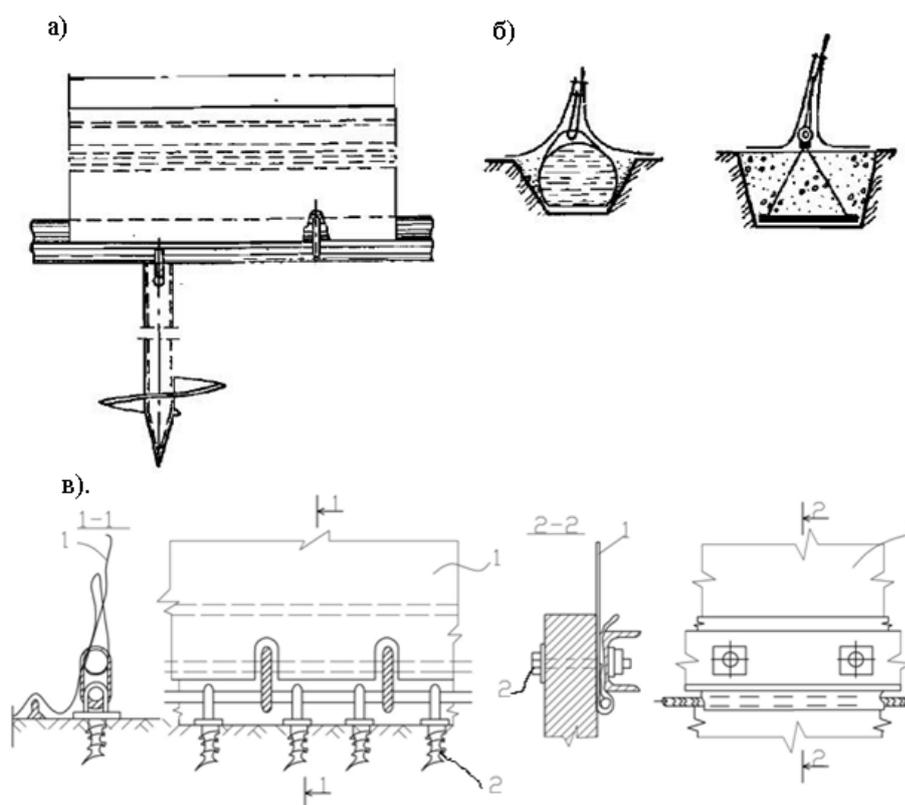


Рис. 7.4.6. Анкерное устройство пневматических конструкций: а) - с креплением канатом; б) - с креплением рукавов, заполненных водой или земляных анкеров; в) - опорное устройство пневматической воздухоопорной конструкции: 1 - оболочка, 2 - анкер

В нашей стране приняты следующие размеры воздухоопорных оболочек: сферические купола диаметром 12, 24, 36, 42, 60 м; цилиндрические оболочки пролетом 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60 м; длина

цилиндрических оболочек в зависимости от пролета изменяется от 24 до 90 м, высота от 6 до 20 м.

Любая классификация таких конструкций условна. Поэтому двухслойные покрытия, называемые пневмолинзамн (на круглом, овальном или многоугольном плане) и пневмоподушками (на прямоугольном плане), занимают промежуточное положение между первой и второй группами. По принципу статической работы их следует относить к воздухоопорным конструкциям, хотя по отсутствию избыточного давления в эксплуатируемом пространстве они близки к воздуходнесомым.

Другие виды конструкций, такие, как пневмооболочка на жестком каркасе или пневмооболочка, поддерживаемая вантами и т. п., принципиально по характеру работы не отличаются от рассмотренных и благодаря дополнительным устройствам являются модификацией внутри группы.

Основными частями воздухоопорной пневматической конструкции являются собственно оболочка, шлюз, контурные элементы с анкерными устройствами, воздуходувные и отопительные установки. Основу несущей конструкции шлюза обычно составляет жесткий каркас из металла, дерева, пластмассы, по которому закрепляют герметизирующую оболочку покрытия. Размеры шлюза зависят от назначения сооружения и колеблются от 1х2х2 м для запасных входов до размеров, обеспечивающих шлюзование реактивных самолетов.

Очень ответственной частью оболочки является анкерное устройство. Из большого числа вариантов анкерных устройств заслуживает внимания конструкция крепления оболочки к фундаменту или к отдельным сваям с помощью двух труб - верхней и нижней. Нижнюю трубу крепят к фундаменту, а верхнюю - к полотнищу оболочки. Затем трубы соединяются скобами. Эффективно анкерное крепление оболочки с применением каната (рис. 7.4.6 а). В сельском строительстве получили распространение схемы

креплений с применением вантовых анкеров, земляных анкеров, рукавов, заполненных водой (рис. 7.4.6 б).

Первоначальная стоимость пневматических сооружений ниже стоимости сооружения из традиционных материалов, однако эксплуатационные расходы на содержание пневматических конструкций выше. Поэтому, оценивая экономическую эффективность пневматических конструкций, необходимо принимать во внимание, что со временем наступает момент, когда суммарные расходы на приобретение и эксплуатацию пневматических конструкций будут превышать таковые для конструкций из других материалов. По зарубежным данным воздухоопорная оболочка размерами в плане 21x57 м после 15 лет эксплуатации по суммарным расходам уравнивается со зданием размером 20x60 м из стальных рам и гофрированной стали.

#### **Материалы для пневматических конструкций.**

Наибольшее распространение для пневматических конструкций получили тканевые материалы, обрешиненные или покрытые полимерами. Реже применяют высокопрочные синтетические пленки одинарные или двойные с внутренним армирующим слоем из синтетических волокон.

Тканевые материалы изготовляют из натуральных, искусственных или синтетических волокон. К натуральным относятся: лен, хлопок, пенька; к искусственным - вискоза, стекловолокно. Синтетические волокна, получившие наибольшее распространение, делятся на группы: полиамидные (капрон, найлон, дедерон, перлон, силон, стилон и др.), полиэфирные (лавсан, дакрон, гризутен, диолен, тревира, теторон, терилен и др.); полиакрилнитрильные (нитрон, орлон, дралон и др.); реже поливинилспиртовые (винол, винилон и др.).

Прочность волокна характеризуется его длиной, в км, при которой происходит разрыв от собственного веса (разрывная длина  $L$ , км). Номер волокна показывает количество метров в одном грамме ( $N$ , м/г).

Тканевая основа может иметь полотняное (одна нить) или рогожное (две или три нити) переплетение. Основными характеристиками тканей являются прочность на разрыв, прочность на раздираание (сопротивление ткани распространению локальных повреждений), относительное удлинение.

Для обеспечения воздухо- и водонепроницаемости тканевую силовую основу покрывают с одной или двух сторон синтетическими каучуками или пластмассами.

Первые несколько дороже и применяются реже, Основными полимерными покрытиями являются хлорсульфированный полиэтилен (ХСПЭ), пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ). Последний светопрозрачен, окрашивается в любой цвет, морозостоек до 30-40 °С.

Основные требования, предъявляемые к материалу оболочек, без которых невозможны пневматические конструкции, являются прочность и воздухо- и водонепроницаемость. К этим двум требованиям добавляют еще долговечность, светопрозрачность, эластичность и легкость, стойкость против химической и биологической агрессии, действия низких и высоких температур, технологичность изготовления и возведения конструкции.

Для массовых серийных оболочек пролетом до 60 м прочность материалов пневматических конструкций колеблется в пределах 20-200 кН/м. Обычный срок службы оболочек из них составляет 5-10 лет.

Для оболочек уникальных сооружений, предназначенных для длительной эксплуатации, применяют ткани из волокон неорганических материалов (стеклянных, стальных, угольных), прочных и стойких к ультрафиолетовому излучению. Поскольку долговечность материала оболочки зависит и от срока службы полимерного покрытия, эту задачу решили с помощью применения фторсодержащего полимера тефлона (политетрафторэтилен). Такие покрытия могут служить 20-30 лет, они светопрозрачны, отталкивают грязь, но пока примерно в 5 раз дороже серийного материала.

В таблице 7.4.2 приведены технические характеристики основных отечественных тканей, применяемых для воздухоопорных оболочек пролетом до 30 м, в т. ч. коэффициенты однородности, длительной прочности и расчетные сопротивления.

Таблица 7.4.2

**Коэффициенты однородности, длительной прочности и расчетные сопротивления основных отечественных тканей**

Марка ткани	Коэффициент однородности ткани $K_{одн}$ при обеспеченности		Коэффициент длительной прочности ткани $K_{дл}$ при сроке службы пневмооболочки		Расчетное сопротивление ткани. Н/м, при сроке службы пневмооболочки			
					5 лет		10 лет	
	При обеспеченности							
	0,955	0,997	5 лет	10 лет	0,955	0,997	0,955	0,997
51-019	—	$\frac{0,674}{0,44}$	$\frac{0,40}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,35}$			—	—
У-93	$\frac{0,85}{0,65}$	$\frac{0,75}{0,75}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,28}{0,37}$	$\frac{12700}{9900}$	$\frac{11200}{6800}$	$\frac{11900}{9100}$	$\frac{10500}{6800}$
У-92	$\frac{0,80}{0,65}$	$\frac{0,70}{0,45}$	$\frac{0,30}{0,37}$	$\frac{0,28}{0,35}$	$\frac{21600}{11500}$	$\frac{18900}{7900}$	$\frac{20100}{10900}$	$\frac{17600}{7500}$
23-М	$\frac{0,80}{0,65}$	$\frac{0,70}{0,45}$	$\frac{0,30}{0,37}$	$\frac{0,28}{0,35}$	$\frac{23000}{12600}$	$\frac{21500}{17200}$	$\frac{21500}{17200}$	$\frac{18800}{11900}$

**Принципы расчета пневматических конструкций.**

Проектирование строительных пневматических конструкций включает решение следующих задач:

- 1) нахождение оптимальной формы оболочки;
- 2) установление характера и величины силового воздействия;
- 3) выяснение физико-механических свойств материалов оболочек и обоснование расчетных сопротивлений;
- 4) выявление перемещений оболочки под действием нагрузок;
- 5) определение напряженно-деформированного состояния оболочки.

Эти задачи, общие для всех конструкций, применительно к пневматическим оболочкам требуют специального подхода.

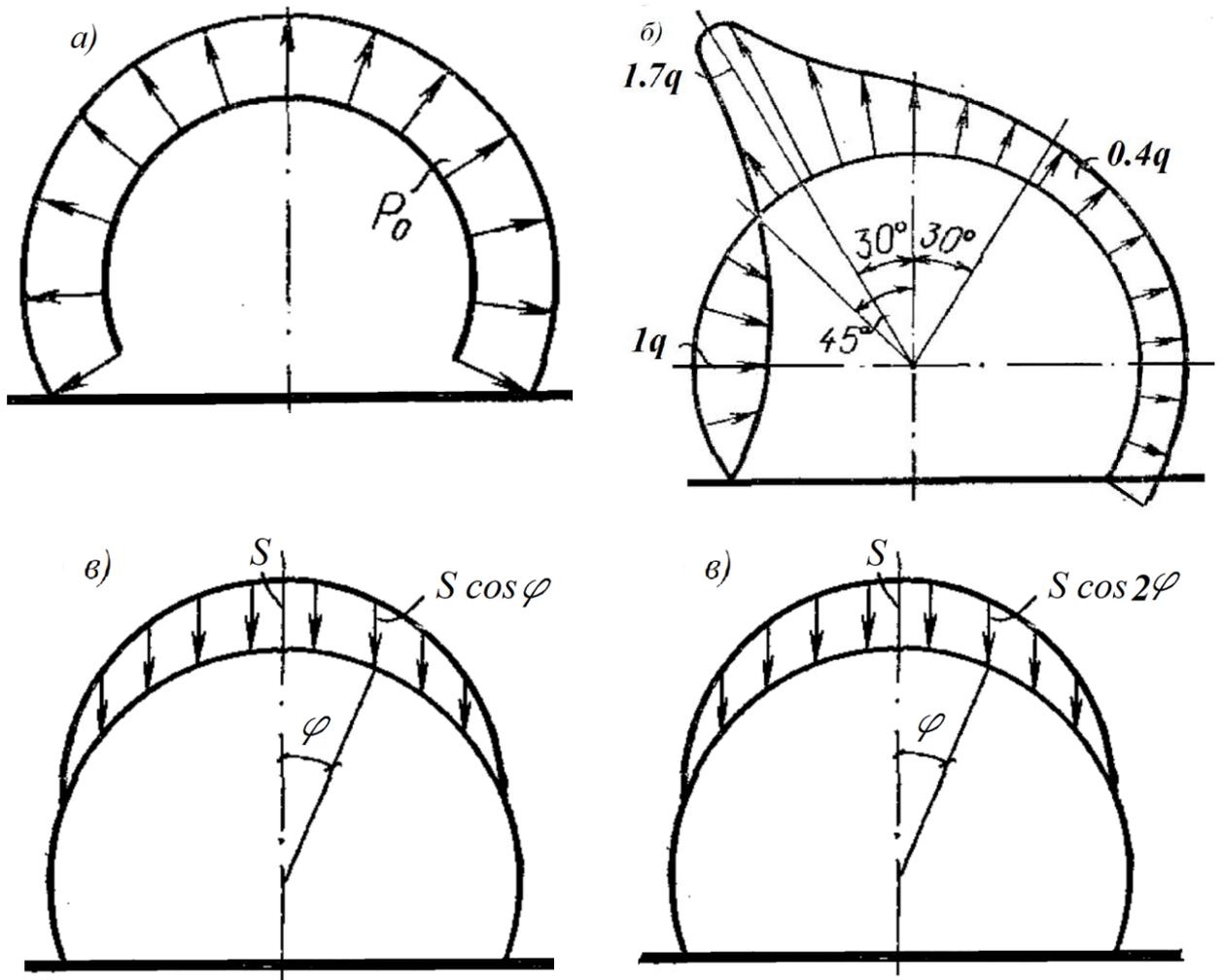
Формальным признаком оптимальной формы оболочки может служить состояние района напряженности во всех направлениях по ее поверхности. К таким поверхностям можно отнести мыльную пленку. Однако найденные таким образом формы будут оптимальными только для воздействия внутреннего давления. При действии любой другой нагрузки это условие будет сразу нарушено и может привести к появлению на поверхности оболочки морщин и складок либо повышению расчетных усилий до уровня расчетных сопротивлений материала. Поэтому учет реальных условий работы оболочки требует анализа ее напряженно-деформированного состояния и коррекции формы поверхности образованной мыльной пленки.

Основными нагрузками на пневматическую конструкцию является избыточное давление, ветровые и снеговые воздействия. Влияние собственного веса оболочки, ввиду его малости по сравнению с другими нагрузками, обычно не учитывают. Однако в некоторых случаях при небольшом давлении под оболочечным пространством собственный вес может значительно влиять на очертание контура оболочки. Так, при отношении избыточного давления  $P$  к собственному весу оболочки  $g$ , равному  $P/g=4...5$ , форма поперечного сечения оболочки отличается от круговой заметно, а при  $P/g=2...3$  - значительно. Распределение избыточного внутреннего давления на оболочку показано на рисунке 7.4.3, а.

Для расчета пневматической конструкции на ветровое воздействие необходимо выявить картину обтекания оболочки потоком воздуха, выраженную в эпюре распределения ветрового давления по ее поверхности. Пока еще это не удалось сделать с достаточной точностью.

Распределение ветрового давления на оболочку меняется не только с изменением геометрии, но и скорости воздушного потока. Ветровое давление, и в частности отсос, из-за исключительной легкости покрытия является силовым воздействием на него. Поэтому для наиболее ответственных сооружений приходится в каждом отдельном случае прибегать к аэродинамическому моделированию. В результате таких

испытаний были установлены для некоторых оболочек критические соотношения  $\psi$  значений скоростного напора воздушного потока  $g$  и избыточного давления  $P$ , при котором на поверхности воздухоопорной оболочки появляются «ветровые ложки» и она входит в неблагоприятный режим колебаний («бафтинг»)  $\psi = P/g$ . Для оболочек в форме три четверти сферы  $\psi \leq 1,1$ . Для полусферы  $\psi \leq 0,8$  для полуцилиндра со сферическими торцами  $\psi \leq 0,7$ . Вариант ветровой нагрузки на пневматическое сооружение показан на рисунок 7.4.7 б.



$B=20 \text{ м}$

$L=50 \text{ м}$

$B=20 \text{ м}$

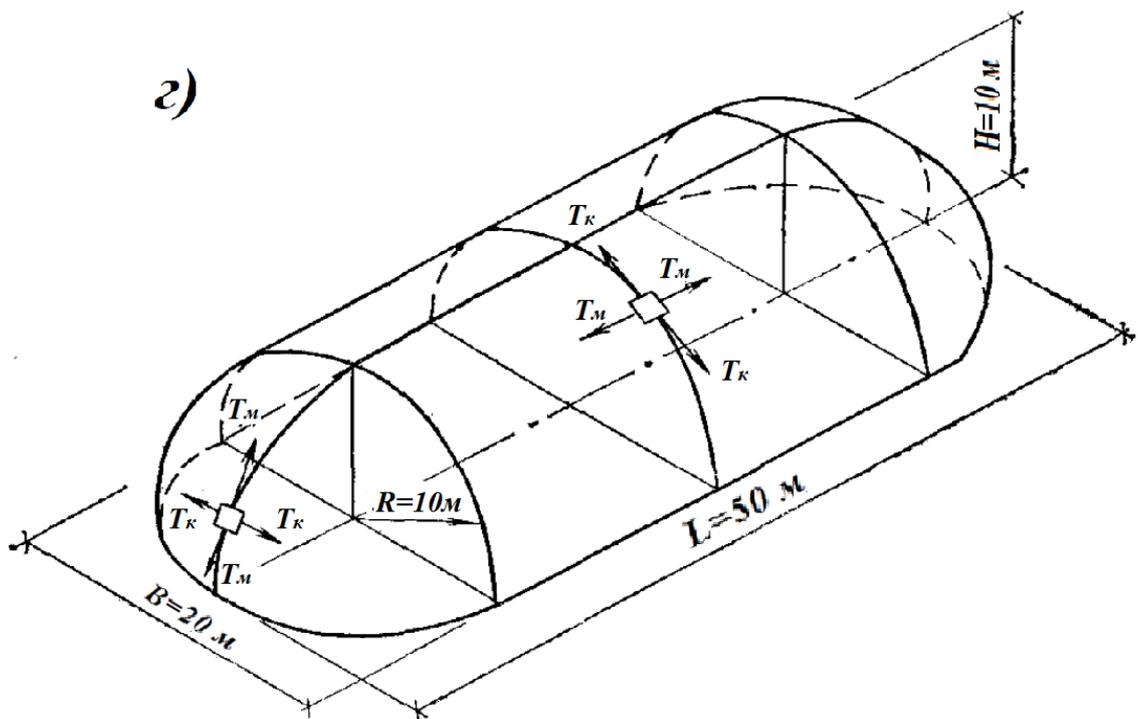


Рис. 7.4.7. Расчет пневматических конструкций: а) - распределение внутреннего давления, б) - распределение ветрового давления, в) - распределение снеговой нагрузки, г) - усилия в пневматической оболочке

Снеговая нагрузка вследствие подвижности и колебания поверхности оболочки не достигает интенсивности, характерной для жестких покрытий. На этом основании принято считать расчетную интенсивность снеговой нагрузки, равную суточному максимуму выпадения снега в данном районе (по статистическим данным за последние 10 лет). Так, например, в зоне умеренных широт европейской части РФ она составляет  $P = 220$  Па. Считается возможным принять распределение снеговой нагрузки на оболочке по закону  $P(\varphi) = P \cos \varphi$  или даже  $P(\varphi) = P \cos 2\varphi$  (рис. 7.4.7 в), где  $\varphi$  - угол наклона касательной к оболочке. При  $\psi \geq 45^\circ$  снег не задерживается на кровле.

Согласно методике расчета по предельным состояниям, расчетное сопротивление материала оболочки разрыву определяют произведением нормативного сопротивления  $R^H$  на коэффициенты однородности  $R_{одн}$  и коэффициенты условия работы конструкций  $K_{усл}$ . За нормативное сопротивление  $R^H$  принимают среднюю кратковременную прочность образцов материала покрытия по результатам статистической обработки заводских или лабораторных испытаний.

Коэффициент однородности находят по формуле:

$$K_{одн}=(1-3)v,$$

где  $v$  - коэффициент вариации.

Сопротивление ткани разрыву зависит от времени действия усилия и учитывается коэффициентом длительной прочности  $K_{дл}$  (таб. 2.2).

Таким образом, расчетное сопротивление ткани без учета старения материала в условиях эксплуатации определяют по формуле:

$$R = R^H K_{одн} K_{дл}$$

Степень старения свойств материала оболочки можно учесть коэффициентом старения:

$$K_{ст} = 1 - N/2\Gamma$$

где  $N$  - порядковый номер года эксплуатации оболочки;  $\Gamma$  - гарантируемый заводом-изготовителем материала срок службы в годах.

Прочность швов соединения полотнищ по отношению к прочности основного материала в разных странах принимают от 70 до 100 %.

Последние две задачи расчета пневматических конструкций особенно тесно взаимосвязаны и их целесообразно рассматривать совместно.

Пневматические оболочки являются кинематически подвижными и геометрически изменяемыми системами. Перемещение оболочки может быть следствием двух причин:

- 1) упругого или пластического удлинения материала (деформации);
- 2) изменения геометрии оболочки при приложении нагрузок - кинематического перемещения, которое в значительной степени обуславливает интенсивность и характер ветровой и снеговой нагрузок.

Изменение геометрии оболочки под действием нагрузок (переход в новое равновесное состояние) соизмеримо с размерами самой оболочки, требует учета геометрической нелинейности, что существенно усложняет задачу расчета.

Прямое использование уравнений классической безмоментной теории оболочек (названной элементарной) оказалось возможным только для решения немногих частных задач - оболочек вращения с осесимметричной нагрузкой и длинных цилиндрических оболочек, загруженных вдоль образующих.

Теория, учитывающая нелинейные зависимости между усилиями и деформациями, с одной стороны (физическая нелинейность) и деформациями и перемещениями, с другой стороны (геометрическая нелинейность), названная математической, приводит к сложной системе дифференциальных уравнений в частных производных, интегрирование которых даже численными методами с применением ЭВМ вызывает большие затруднения и в настоящее время не имеет выхода к решению практических задач.

Создавшееся положение привело к возникновению технической теории, занимающей промежуточное положение между математической и элементарной. В технической теории используют некоторые обоснованные допущения, позволяющие решать практические инженерные задачи, часто с оценкой погрешности относительно общей (математической) теории мягких оболочек.

По технической теории деформируемое состояние оболочки раскладывается на два - основное и дополнительное. Определяются малые перемещения при дополнительном состоянии, которые накладываются на деформируемую оболочку при основном состоянии. Геометрия основного состояния предполагается известной, а усилия находятся по элементарной теории.

Для вычисления перемещений оболочки в последнее время успешно применяют метод конечного элемента (МКЭ). После приложения к оболочке нагрузок вся система конечных элементов, соответствующая исходной (раскройной) форме оболочки, для достижения нового равновесного состояния совершает необходимые перемещения, определяемые последовательными приближениями с помощью ЭВМ.

Для нахождения максимальных значений растягивающих усилий в воздухоопорных оболочках при действии невыгоднейшей комбинации расчетных нагрузок для рядовых оболочек сферической или цилиндрической формы небольших пролетов (до 50 м) можно использовать простые формулы:

$$T_m = 0.5PR + \beta qR;$$

$$T_k = \alpha PR + \beta qR;$$

где  $T_m$ ,  $T_k$  - меридиональные и кольцевые усилия (рис. 7.4.7 г);  $P$  - избыточное давление воздуха под оболочкой;  $q$  - скоростной напор ветра;  $\alpha$ ,  $\beta$  - коэффициенты, значения которых установлены методами элементарно или какой-либо другой уточненной теории. Значения  $\alpha$ ,  $\beta$  приведены в таблице 7.4.3.

Таблица 7.4.3

Значения коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  в формулах меридиональных  $T_m$  и кольцевых  $T_k$  усилий пневматических оболочек

Т <sub>м</sub> при H/R, β				Т <sub>к</sub> при H/R, β				Форма оболочки, значения α
0,5	0,75	1	1,5	0,5	0,75	1	1,5	
0,7-1,3	1-1,4	1,3-1,5	1,7- 1,75	0,7-1	1,0-1,1	1,2-1,3	1,7-1,75	Сферические оболочки и сферические окончания цилиндрических оболочек α=0,5
1,1-1,3	1,1-2,3	1,2-1,8	1,5-1,6	0,7-0,9	0,9-1	0,8-1	0,75-1,25	Цилиндрические части цилиндрических оболочек α=1

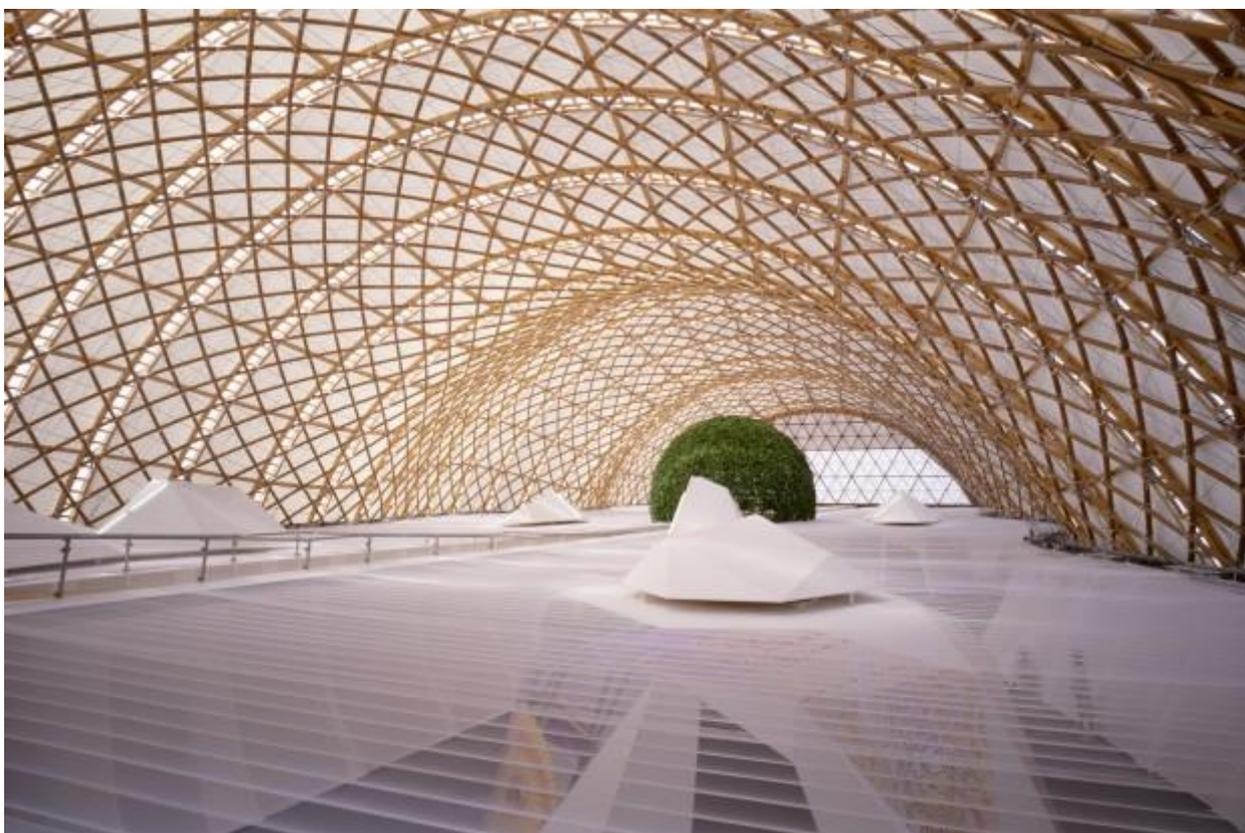
По усилиям на контуре оболочки, найденным по аналогичным формулам, рассчитывают анкерные устройства оболочек, которые должны проектироваться с особой тщательностью, так как при неудачных решениях их стоимость может быть выше стоимости самой оболочки. Коэффициент запаса для расчета прочности и устойчивости анкерных устройств опорного

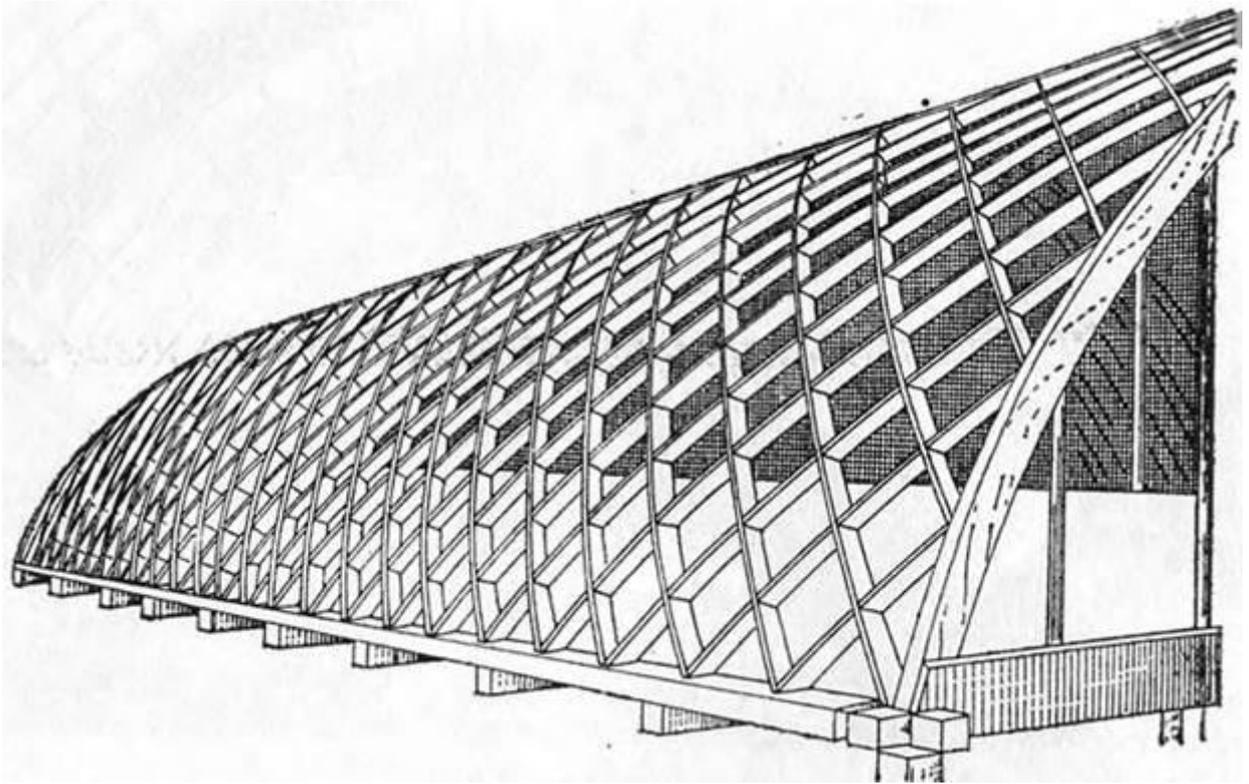
контура в разных странах колеблется в пределах 1,2-3 в зависимости от площади перекрываемого помещения.

Хотя расчет оболочки позволяет определить наибольшие усилия и этим обозначить места наиболее вероятных разрушений оболочки, тем не менее изучение причин аварий воздухоопорных сооружений показывает, что формой их разрушения является не разрыв, а раздирание, т.е. по причинам, не учитываемым расчетом, но требующим детального изучения напряжений, приводящих к раздиранию. Положение выравнивается пока благодаря введению высоких коэффициентов запаса от 2,5 до 5.

### **7.5 Распорные своды.**

В зависимости от применяемого материала своды могут быть пластмассовыми, деревянными, клефанерными и комбинированными, сочетающими разные материалы. По конструктивному исполнению их можно разделить на гладкие, ребристые, волнистые, складчатые, сетчатые, структурные, а также сплошные, двухслойные и трехслойные. По форме покрытия - на цилиндрические, стрельчатые, параболические,





*Рис. 7.5.1. Распорные своды*

полигональные, призматические, бочарные, тороидальные. По способу передачи распора - на фундаменты, поддерживающие конструкции, и затяжки. По уровню расположения опор - на своды, опирающиеся непосредственно на фундаменты, и на поддерживающие покрытия конструкции. По статической схеме - на двух- и трехшарнирные.

По частоте применения конструктивной формы среди пространственных конструкций своды занимают второе место после куполов. Доля сводов в пластмассовых покрытиях достигает 25%. Большое распространение получили кружально-сетчатые своды из деревянных цельных, значительно реже из клееных и клефанерных элементов. Максимальные пролеты, которые можно перекрывать пластмассовыми сводами, могут достигать 20-40 м, клефанерными 30-60 м, кружально-сетчатыми - до 100 м.

Сводчатые покрытия получили распространение в самых разнообразных зданиях и сооружениях гражданского, промышленного и сельскохозяйственного назначения.

Гладкие пластмассовые своды сплошные, однослойные и двухслойные обычно применяют для небольших пролетов (до 4 м) в закрытых переходах и

световых фонарях. Своды могут быть предварительно напряженными, светопрозрачными и нестепрозрачными. Основной материал - полиэфирный стеклопластик, поликарбонат.

Гладкие трехслойные своды имеют обшивки из листовых материалов (фанера, стеклопластик) и средний слой из пенопласта. Панели свода могут быть криволинейного очертания или плоскими, вписывающимися в окружность. В зависимости от пролета и длины дуги свода размер панели по хорде принимают обычно до 6 м. Ширина панели 1,5; 2; 3 м. Учитывая сборную конструкцию свода, особое внимание уделяется конструированию стыков панелей.

Расчетной схемой свода является трехшарнирная арка шириной 1 м. Методика расчета панели на прочность аналогична расчету плоских панелей покрытия с дополнительным учетом продольной силы.

Ребристые своды имеют одну или две обшивки из листового материала (стеклопластик, водостойкая фанера) и деревянные, пластмассовые или металлические ребра. В отапливаемых зданиях между обшивками размещают утеплитель из пенопласта или минераловатных плит. Для сокращения числа монтажных элементов секцию свода проектируют из двух частей. Форма поверхности покрытия может быть разнообразной, но чаще всего цилиндрической или стрельчатой. Сборные элементы соединяют выступающими ребрами с помощью стяжных болтов, обеспечивающих необходимую плотность для герметизации стыков.

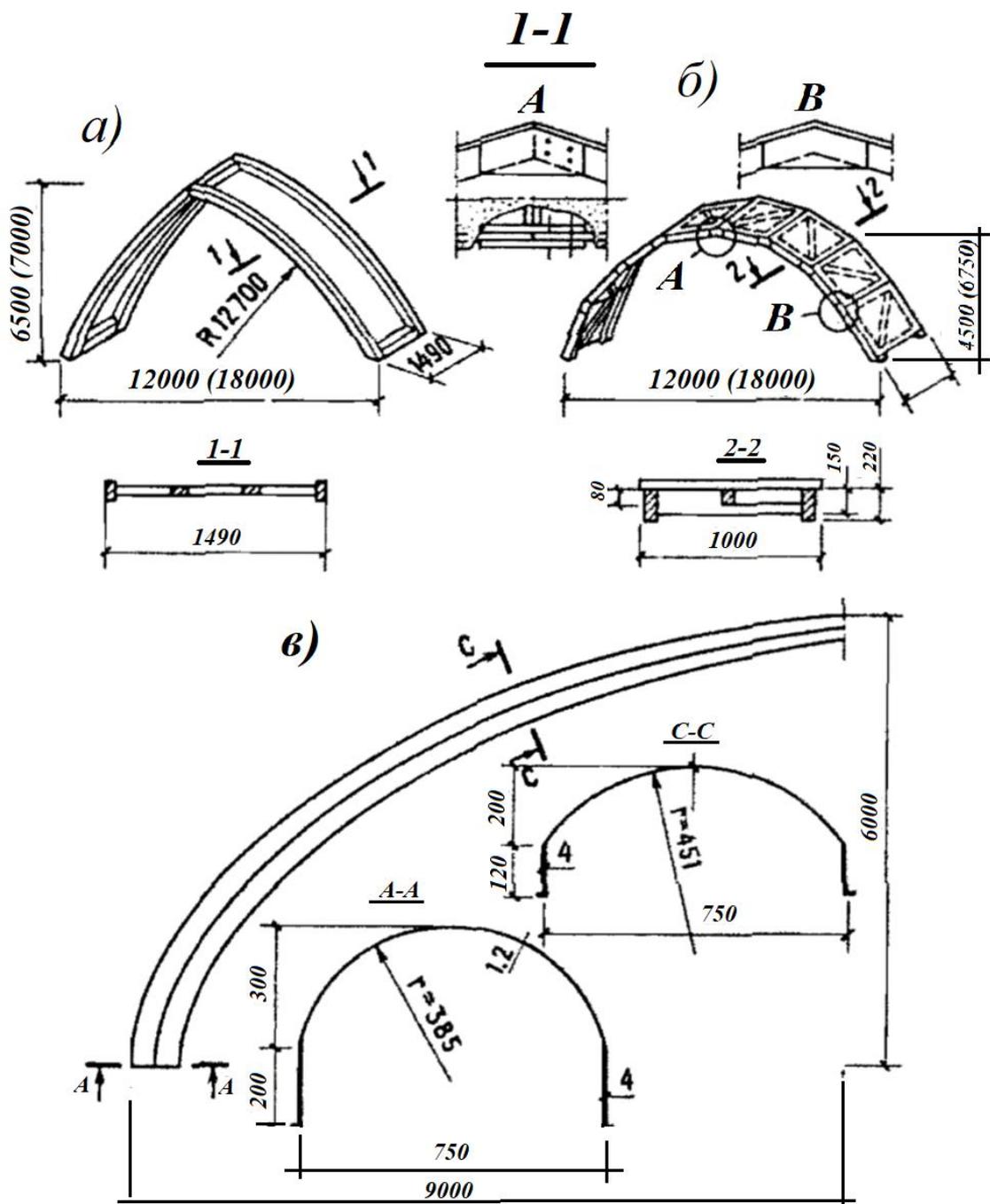


Рис. 7.5.2. Сборные сводчатые покрытия: а) - клефанерный свод из криволинейных ребристых панелей; б) - клефанерный полигональный свод; в) - сводчатое волнистое покрытие из стеклопластиковых элементов

Ребра сводов могут быть криволинейными из клееных элементов или из одиночных досок на ребро, соединенных между собой зубчатым клеевым соединением или фанерными накладками.

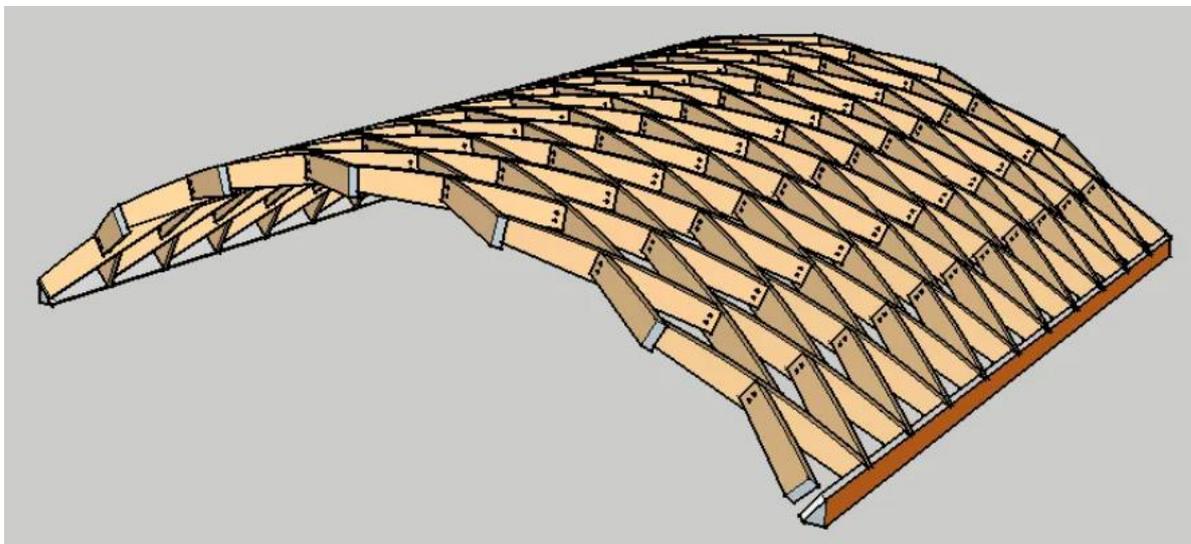
Примером сборных ребристых сводов могут быть сводчатые покрытия складских помещений, показанные на рисунке 7.5.2 а, б. Стрельчатый свод пролетом 12 м и 18 м состоит из криволинейных клефанерных панелей шириной 1,5 м с двумя обшивками из водостойкой фанеры. Для соединения

смежных панелей болтами запроектированы выступающие ребра. Для складов минеральных удобрений целесообразно использовать стеклопластиковые болты. Свод опирается непосредственно на фундаменты.

Сводчатое многогранное покрытие (рис. 7.5.2 б) из дощатых ребер и стеклопластиковой обшивки пролетом 12 и 18м разработано применительно к складам минеральных удобрений. Состоит из двух монтажных блоков в каждой секции, стыкуемых в коньке болтами. Диагональные элементы каркаса предназначены для увеличения жесткости и обеспечения устойчивости тонкой обшивки (2-3 мм). Для повышения естественной освещенности часть блоков или все блоки могут иметь обшивки из светопрозрачного полиэфирного стеклопластика.

Кружально-сетчатые своды (рис. 7.5.3) представляют собой пространственную конструкцию, которая состоит из отдельных, поставленных на ребро стандартных элементов - косяков, идущих по двум пересекающимся направлениям и образующих ломаные винтовые линии.

В кружально-сетчатых конструкциях выгодно сочетаются индустриальность изготовления элементов с преимуществами пространственных конструкций. Прочность и надежность свода определяются средней прочностью многих элементов, и влияние качества древесины отдельных элементов имеет меньшее значение, чем в плоскостных конструкциях.



а)

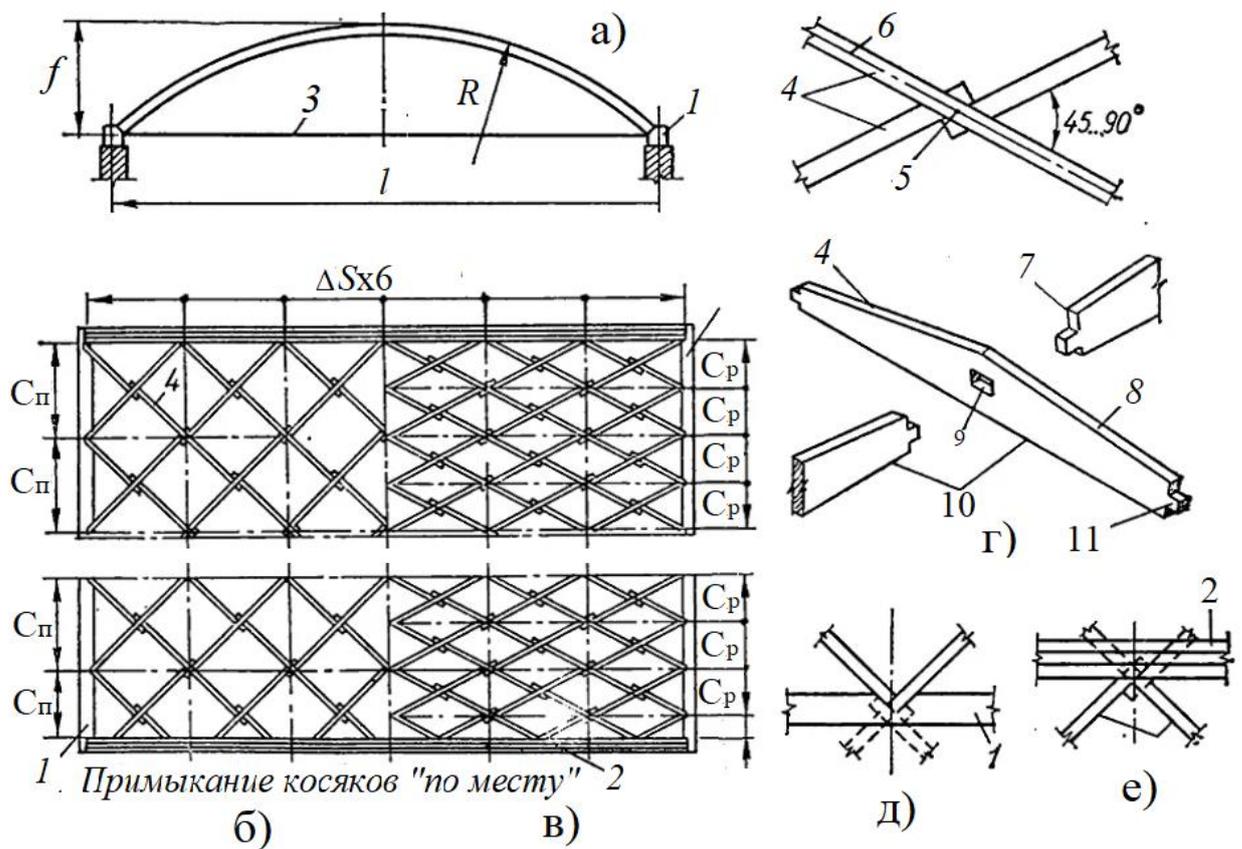


Рис. 7.5.3. Безметалльный кружально-сетчатый свод системы Песельника с косоугольной сеткой  
 а) общий вид, б) развертка свода с прямоугольной сеткой, в) развертка свода с ромбической сеткой, г) основной (средний) узел, д) опорный узел, е) узел примыкания к фронтальной арке, 1 - мауэрлат, 2 - фронтальная арка, 3 - затяжка, 4 - основные косяки, 5 - центр узла, 6 - ось верхней грани сквозного косяка, 7 - торец косяка, 8 - верхняя грань, 9 - гнездо, 10 - нижняя грань, 11 - шип

Кружально-сетчатые своды в поперечном сечении имеют снаружи круговое или правильное многоугольное очертание. В первом случае верхняя грань косяков имеет близкое к круговому эллиптическое очертание, а во втором - ломаное. Распор покрытий воспринимается либо металлическими затяжками, либо непосредственно опорами.

Характерными особенностями всех кружально-сетчатых покрытий являются:

- 1) унификация формы и размеров косяков, дающая возможность заготавливать их заводским способом, что отвечает требованиям индустриализации и стандартизации строительства;
- 2) транспортабельность элементов при их перевозке;
- 3) простота и быстрота сборки конструкции;

4) возможность и необходимость устройства кровельного настила непосредственно по несущей конструкции (без прогонов и вспомогательных стропильных ног).

В зависимости от способа узлового соединения косяков различают два конструктивных варианта кружально-сетчатых сводов:

- 1) с узлами на шипах;
- 2) с металлическими связями в узлах.

Оба варианта можно выполнять либо из косяков цельного сечения, которое ограничено размерами сортамента пиломатериалов, позволяющего применять своды с предельным пролетом не более 20 м, либо из клефанерных или клееных косяков, которые дают возможность перекрывать значительно большие пролеты (до 100 м).

В конструкции покрытий всех систем различают три типа узлов: основные (средние); опорные, в которых косяки соединяются с настенными брусками, и торцевые, в которых косяки соединяются с торцевой аркой. Основные узлы сетки образуются из трех косяков, один из которых является сквозным и проходит через узел, не прерываясь, а два других набегающих косяка примыкают к сквозному косяку.